迈向 4K，HDR 先行

胡澄宇
（湖北广播电视台，湖北 武汉 430000）

摘 要：本文主要想探讨现阶段电视节目制播的优先发展侧重点，根据 4K 超高清国家标准中分辨率和 HDR 不绑定的技术特点，结合广电行业现状，从人眼视觉特性出发，提出了广电应在制播环节优先推广 HDR 技术，迅速形成高画质生产能力，推动广电行业向 4K 平稳过渡的技术思路。

关键词：4K；分辨率；HDR；色域范围；瑞利判据；HVS **中图分类号：**TN948.13 **文献标识码：**A
文章编号：1671-0134（2022）04-158-03 DOI：10.19483/j.cnki.11-4653/n.2022.04.047
本文著录格式：胡澄宇 . 迈向 4K，HDR 先行 [J]. 中国传媒科技，2022（04）：158-160.

1. 行业现状

进入新时代，娱乐爆发、信息膨胀、经济飞速增长，人们对影视娱乐的追求表现出层级分明的特点。既有追求轻松便携移动享受的手机族、平板族大量增加，还有大量追求大屏电视、高端投影等更高层次影音体验的人群。随着人民生活水平提高，精神文化追求的提升，越来越多的人愿意为高层次的体验买单。[1]

工业和信息化部、国家广播电视总局共同组织制定 4K 的技术规范和标准，伴随而来的就是电视设备发展飞速进入 4K 时代，纵观整个消费市场，电视接收机行业已经全面进入 4K 超高清阶段。但 4K 超高清内容生产并未跟上，而且难以在短期内突破。

2. 广电面临的问题

广播电视正处在高清向 4K 超高清发展的过渡阶段，很多广播电视台刚完成全台技术系统的全高清化建设。如果广电行业马上全面开展 4K 超高清技术体系建设，实现难度大，易造成过度投资，而且并不能迅速形成内容生产能力。这主要是相较高清而言，一方面是 4K 技术系统的投资巨大，建设难度成倍增加；另一方面，4K 节目的生产工艺更加复杂。

广电行业面临终端显示技术突飞猛进，需要在保护投资的前提下，确定向 4K 超高清过渡的技术路线，明确技术体系向 4K 发展中优先解决的重点环节，然后再逐步实现“采、编、播、管、存、发”技术体系的 4K 全面过渡。广电行业作为最大的内容生产商，在面临海量高画质内容需求且 4K 系统短期内无法跟上的同时，必须考虑首先解决如何提升画面品质的问题。[2]

因此，广电行业需要首先从制播技术环节入手，大幅提升画面品质，满足高画质内容收视的实际需求，最终实现平稳过渡。

3. 4K 标准和规范的分析

工业和信息化部、国家广播电视总局共同组织制定的《超高清视频标准体系建设指南（2020 版）》中制作和参数规范部分，明确表明高动态范围（HDR，High-Dynamic Range）电视制作和交换图像参数值依据国际标准 ITU-RBT.2100-1（后简称 BT.2100）；根据 BT.2100 的规范，分辨率（容器像素数）包含：7680×4320、3840×2160、1920×1080。

按照标准，HDR 节目制作是支持以上三种分辨率的。而且在 BT.2100 中明确定义了，4K 分辨率和 HDR 不是绑定关系。因此除了提升分辨率，还可以从 HDR 入手，也是改善画质的有效方法。[3]

4. 使用 HDR 技术提升收视体验

4.1 超高分辨率的有限影响

4.1.1 人眼的分辨率是有限的

电视技术的发展经历了黑白到彩色、标清到高清的发展历程。黑白到彩色，将画面从单调呆板变得生动活泼。标清到高清，让画幅从 4：3 变为 16：9，分辨率也提升 4 倍多，让画面中能展示的元素更多更细致，视野也更贴近人眼的真实视觉感受。4K 超高清则将分辨率更进一步提升 4 倍，让画面细节前所未有的细腻真实。

虽然视频技术一直在进步，设备的分辨率不断提高，但人眼的视觉能力是一定的。根据成熟的研究成果，由于光成像会受到衍射影响，人眼作为一个光学器件，也会受此影响。[4] 因此，实际成像与人眼所看到的成像会有差别，不会形成理想几何成像，那么显示设备的显示像素在人眼视觉中就会变成光斑，类似艾里斑，导致人眼在现实中较难分辨显示屏上的像素点间隙。

当两个像素过于靠近的时候，其表现出来的像素光斑会重叠，难以分辨是一个像素还是两个像素，在光学体系中是存在分辨极限的，而这个分辨能力可以用瑞利判据进行测算。人眼分辨率同样必须满足瑞利判据：

$$\triangle Q = 1.22\lambda D$$

人眼的瞳孔直径 D 为 2mm ~ 9mm，取中间值 D 为 5mm，可见光中心波长也就是人眼最敏感的波长为 5500 埃，因此人眼的分辨极限角为 1′（一分）。当物体对人

眼的视角小于 1′(一分) 时，人对物体的细节就不能分辨，看起来就是一点，这时物体在视网膜上的像刚好是一个感光细胞的大小。

通过以上分析，人眼的分辨能力是有限且可以量化的。

4.1.2　超高清的分辨率对普通观众的影响有限

视频图像分辨率是指在整幅图像的宽度和高度上构成图像像素点数的集合。例如，标准的 HD（高清）分辨率图像是指在水平方向上具有 1920 个像素点、纵向上有 1080 个像素点；目前广电标准的 4K 分辨率图像在水平方向上具有 3840 个像素点、纵向上有 2160 个像素点。

目前广泛使用的图像像素均为正方形像素。则只需要针对单一方向上的像素进行测算，即人眼较为敏感的水平方向。根据显示终端设备的物理属性进行计算：

屏幕上 HD 分辨率图像上两个相邻像素间距：

$D_{HD}=W/1920$；

屏幕上 4K 分辨率图像上两个相邻像素间距：

$D_{4K}=W/3840$；

人眼可以分辨的图像上两个相邻像素间距：

$D_{res}=X*W*\tan 1'$。

其中 $X=D/W$，X 为观众与屏幕距离的关系 (比值)，W 为屏幕宽度，D 为观众到屏幕的距离。

若 $D_{HD}/D_{RES}\geqslant 1$ 时，$D_{HD}\geqslant DRES$；同样，若 $D_{4K}/DRES\geqslant 1$ 时，$D_{4K}\geqslant DRES$，则可以根据瑞利判据断定此时人眼能分辨像素间距，此时可以看出画面是由点状像素组成，画面效果粗糙。

若 $D_{HD}/DRES<1$ 时，$D_{HD}<D_{RES}$；同样，若 $D_{4K}/D_{RES}<1$ 时，$D_{4K}<D_{RES}$，则表示人眼已经无法分辨画面像素间距，此时屏幕画面平滑细腻。

由此可以推算出针对 HD（高清）、4K（超高清图像）的分辨临界值：

HD（高清）图像：

$$D_{HD}/D_{RES}=\frac{\left(\frac{1}{1920*(\tan(\frac{1}{60}))}\right)}{X}=\frac{1.790}{X}$$

4K（超高清图像）：

$$D_{4K}/D_{RES}=\frac{\left(\frac{1}{3840*(\tan(\frac{1}{60}))}\right)}{X}=\frac{0.895}{X}$$

其中 X 是观众距离屏幕的距离与屏幕宽度的比值，因此只需要测算 X 即可确定观众是否能分辨 HD（高清）与 4K（超高清）的实际观看区别。

目前市场上电视机销售量最大的为 55 寸和 65 寸两种规格，取较大尺寸电视进行测算。

65 寸电视的屏幕宽度 W= 80.94cm，一般观众在客厅或卧室的观看电视的距离 D 为 3m–4m，实际上极少能达到 4m，取均值 3.5m，则可以推算出 X=D/W=3.5/0.8094=4.32；此时分辨系数计算如下，

高清图像的分辨系数：

$$D_{HD}/D_{RES}=\frac{1.790}{4.32}=0.414<1$$

4K 超高清图像的分辨系数：

$$D_{4K}/D_{RES}=\frac{0.895}{4.32}=0.207<1$$

根据瑞利判据，在此观看条件下，HD 高清视频和 4K 超高清视频都能达到平滑细腻的显示效果，而且均超出了人眼的实际辨别能力，都能满足日常观赏的需求。

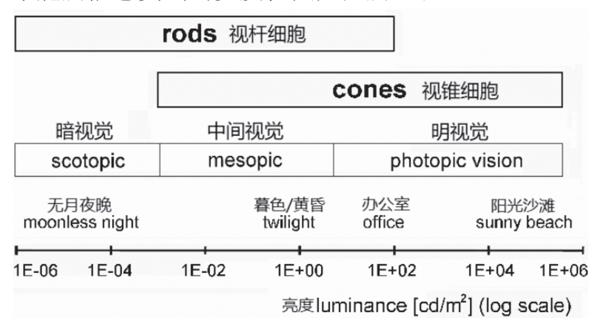
因此在现阶段，绝大部分观众，是较难区分 4K 和高清在分辨率上的差别。

4.2　HDR 对收视体验的积极影响

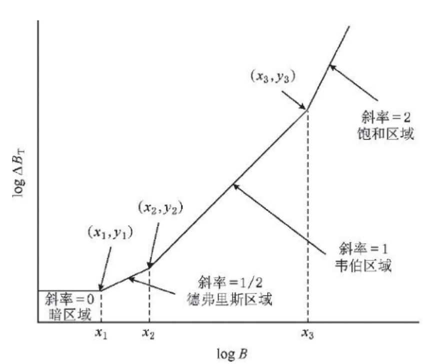
4.2.1　亮度影响分析

人眼除针对分辨力指标外，还有一套人类视觉系统（the Human Visual System，HVS）来描述人眼特性对光的反应，不同色相的色光作用于人眼会产生不同亮度的感受。而亮度同时在很大程度上受光强度影响，光强度越强，亮度越高，反之亮度则越弱。[5] 人眼对亮度的反应主要依靠视网膜上的两种感光细胞（photoreceptor cell）。在正对瞳孔的中央部位分布着密集的锥状细胞（cone cell），在中央部位的四周则主要是杆状细胞（rod cell）。

人眼对亮度适应性非常强，真实世界中的亮度范围大约在 $10^{-6}\sim10^{9}$ cd/m² 之间。人眼能够感知到的最大亮度范围大约有 $10^{-3}\sim10^{6}$ cd/m²，瞬间的视觉动态范围对比度可以达到 1：10^{5}。瞳孔的大小可以控制射入视网膜上光线的强度，成年人瞳孔直径的变化范围为 2~8mm，相当于四级光圈，射入光线的强度相差 16 倍。两种视神经细胞所能感受到的亮度范围如图所示。

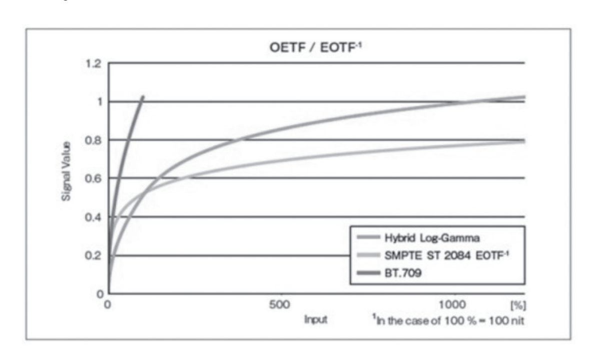


但是人眼对亮度的反应并非是线性的，比如在昏暗的房间内，人们看到的烛光是明亮的，而同样的烛光放在正午的阳光下，人们甚至连火苗都看不见，说明人眼对亮度变化的反应随着亮度的增加而减弱。人眼的这种特性近似于对数函数。如下图所示。



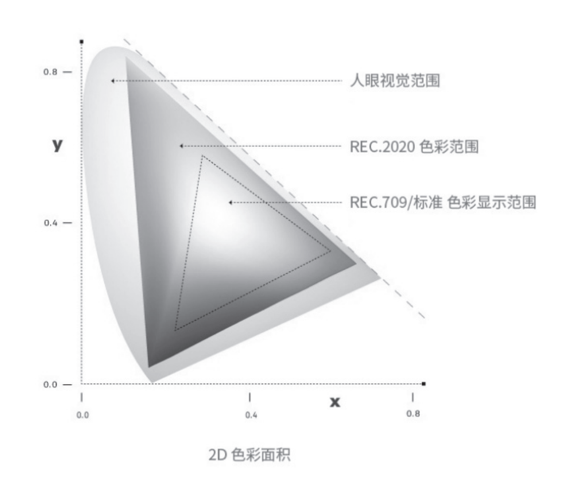
在广电行业，为了配合人眼视觉特性，能让观众正确的看到画面所传递的内容，从 1993 年沿用至今的 ITU-R BT.709 标准针对人眼特点定义了一套 OETF（光—电转换总特性），即目前所使用的 SDR（标准动态范围）标准。其具体内容这里不讨论，但值得注意的是这套标准的制定完全受限于当时的技术条件，将峰值亮度定义到 100 cd/m2，对比度在 1000：1 到 2000：1，这个标准早已无法满足实际需求。

为了更好地对真实世界进行还原，提升观看感受，HDR 技术在近几年开始大力发展。虽然 HDR 标准有多种，但无论哪种标准，目前都能提供 1000 cd/m2 以上的峰值亮度，而色彩空间可支持到 P3 或者 Rec.2020。[6] 如下图是 BT.709 与 ST 2084（也就是 HDR 标准中较为流行的 PQ 标准）的 OEFT/EOTF 曲线对比图，明显可见 HDR 模式下，画面的亮度信号描述能力要远远强于原有的 BT.709。



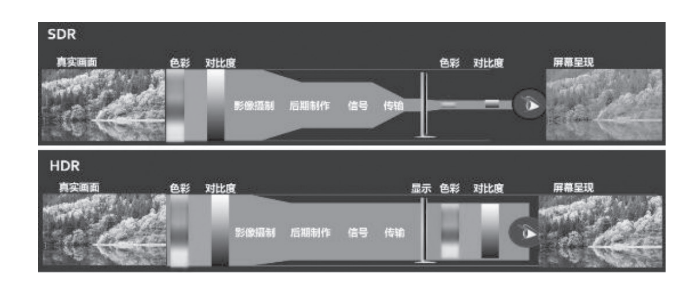
4.2.2　色域影响分析

对比传统的 SDR 视频图像，HDR 视频图像在色彩上更丰富，目前主流的 HDR 标准，均支持 REC.2020 色域，远大于原 REC.709 的色域范围，更接近人眼视觉范围。具体如下图所示。



2D 色彩面积

HDR 视频具备更好的高光细节和暗部细节，加强了对比度上的提升，对观众而言，能带来更好的观看体验。摆脱 SDR 影像该亮的“上不去”，该暗的一片“死黑”的问题。让电视画面更接近真实世界。



在内容制播环节充分利用 HDR 技术，能带来立竿见影的收视效果提升，不需要观众贴近屏幕就能分辨出画面效果优劣。

结语

按照广电行业目前的状况，必须制定逐步由高清向 4K 过渡的技术路线。应该充分利用 HDR 技术挖掘现有的高清制播系统的潜力，迅速形成大规模的高画质内容生产能力，满足市场对高画质内容的需求，提升广电行业的影响力，推动广电行业向 4K 全面升级，助力媒体深度融合。

通过充分利用 HDR 技术，逐步完善高画质内容的生产工艺，以较低的投入换取较高的观看体验升级。目前在国际市场上，此模式早已推广，如 NETFLEX、YouTube 等以品质和技术著称的媒体平台都支持以 1080P HDR 模式进行观看，既降低门槛的同时大大提升观众的欣赏体验，还能兼顾移动终端设备收看，2019 年后市面上主流的中高端移动设备如手机、平板电脑等均已实现软硬件支持 1080P HDR 显示模式。媒

参考文献

[1] 夏青 . 探析 4K HDR 技术发展、制作和播出流程 [J]. 中国传媒科技，2021（6）：155-157.

[2] 蒲方 . 国内 4K/8K 超高清电视发展的思考与实践 [J]. 中国传媒科技，2021（7）：143-145.

[3] 谭阳 . 4K HDR 制作系统进行 HD SDR 制作流程介绍 [J]. 现代电视技术，2020（3）：55-58.

[4] 吴俊杰 . 关于 4K&HDR 节目的拍摄制作研究 [J]. 通讯世界，2019（10）：29-30.

[5] 张坤永，丁成波 . 论新媒体 4K HDR 直播平台建设 [J]. 西部广播电视，2019（5）：212-213.

[6] 成六祥，邢卫东 . 4K 超高清节目制播中 HDR 与 SDR 的兼容与转换 [J]. 广播与电视技术，2019（4）：23-28.

作者简介：胡澄宇（1982-），男，湖北武汉，工程师，研究方向：广电工程。

（责任编辑：胡杨）